

Mémoire technique – Tramway de Québec

Référence : FR01T19A18-T-IDP3-MT-GE00-0017-A



RÉSEAU STRUCTURANT DE TRANSPORT EN COMMUN

**MANDAT 10 – ÉTUDE VIBRATOIRE – RAPPORT
COMPLÉMENTAIRE – TRACÉ DU PÔLE DE SAINT-ROCH AU PÔLE
D'ESTIMAUVILLE**





MÉMOIRE TECHNIQUE

Mandat 10.1 – Étude vibratoire – Rapport complémentaire –Tracé du Pôle de Saint-Roch au Pôle D’Estimauville

IDENTIFICATION DU DOCUMENT	
N° du document SYSTRA Canada	FR01T19A18-T-IDP3-MT-GE00-0017-A
N° du document client	XX

RÉV.	DATE	MODIFICATION	PRÉPARÉ PAR	RÉVISÉ PAR	APPROUVÉ PAR
A	2022-04-29	Première diffusion	CF	EA/PTR	ELE

Préparé par :

Cédric Faure
Chargé d’études Acoustique - Vibrations

Signature

Révisé par :

Éric Augis
Responsable pôle Acoustique-Vibrations

Signature

Pascal Texier
Responsable infrastructure

Signature

Approuvé par :

Éric Le Hir
Chargé de projet principal

Signature





TABLE DES MATIÈRES

1.	OBJET DE L'ÉTUDE _____	1
2.	DESCRIPTION DU SITE MODÉLISÉ _____	1
3.	RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE _____	1
4.	SÉLECTION DES SITES D'ÉTUDES ET TRONÇONS HOMOGENES ASSOCIÉS _____	1
5.	DONNÉES D'ENTRÉE DU MODÈLE _____	9
5.1	ÉMISSIONS VIBRATOIRES DU TRAMWAY	9
5.2	MESURE DE LA TRANSMISSIBILITÉ DES VIBRATIONS DANS LE SOL ET DANS LES BÂTIMENTS (MOBILITÉS DE TRANSFERT)	10
5.2.1	TRANSMISSIBILITÉ DES VIBRATIONS DANS LE SOL.....	11
5.2.2	TRANSMISSIBILITÉ DES VIBRATIONS DANS LES BÂTIMENTS.....	14
6.	RÉSULTAT DU CALCUL D'IMPACT VIBRATOIRE _____	20
6.1	RESULTATS SANS MESURES DE MITIGATION	20
6.2	RESULTATS AVEC MESURES DE MITIGATION	22
7.	CONCLUSION _____	23
8.	DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE _____	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Valeurs maximales recommandées de vitesse vibratoire (<i>LvSmax</i>) et de bruit solidien (<i>LpASmax</i>) à l'intérieur des résidences et bâtiments de bureaux, pour des événements fréquents, selon recommandations de FTA [2]	1
Tableau 2 :	Description des bâtiments et de la vitesse du tramway pour chaque tronçon homogène	2
Tableau 3 :	Emplacement et date des essais de mesurage de la transmissibilité des vibrations dans le sol et des fonctions de transfert des bâtiments	11
Tableau 4 :	Critère d'identification des niveaux d'impact et code couleur utilisé.....	20
Tableau 5 :	Résultats de simulation des niveaux de vitesse vibratoire et de bruit solidien avec une pose de voie courante	20
Tableau 6 :	Résultats de simulation des niveaux de vitesse vibratoire et de bruit solidien avec dispositif de voie anti-vibratile	22



LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Tracé de la ligne de tramway entre la 4 ^e Rue et le Pôle D’Estimauville.....	1
Figure 2 : Plan d’ensemble du Pôle d’Estimauville.....	2
Figure 3 : Illustration des différentes zones d’exposition homogènes	1
Figure 4 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 1 à 5.....	4
Figure 5 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 5 à 8.....	5
Figure 6 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 8 à 13.....	6
Figure 7 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 13 à 18.....	7
Figure 8 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 18 à 21.....	8
Figure 9 : Vitesse de circulation du tramway entre le Pôle de Saint-Roch et le Pôle D’Estimauville.....	9
Figure 10 : Emplacement des sites de mesure de transmissibilité des vibrations dans le sol et des fonctions de transfert sol/bâtiment.....	10
Figure 11 : Représentation schématique des emplacements des mesures de transmissibilité vibratoire du sol (LTM) [4].....	12
Figure 12 : Mobilités de transfert linéiques sur le sol à une distance de 12 m de la source pour les cinq sites d’essai.....	13
Figure 13 : Décroissance des niveaux vibratoires émis par le tramway en surface du sol pour les cinq sites caractérisés	14
Figure 14 : Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTb) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 1....	16
Figure 15 : Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTB) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 2....	17
Figure 16 : Représentation des points de mesures pour la caractérisation des fonctions de transfert sol/bâtiments [4]	18
Figure 17 : Représentation des points de mesures pour la caractérisation des fonctions de transfert sol/bâtiments [4]	19



1. OBJET DE L'ÉTUDE

Cette étude vise à analyser les risques d'impact vibratoire liés à l'exploitation de la section de la ligne de tramway entre la 4^e Rue et le Pôle D'Estimauville, suite aux dernières évolutions de la conception de la ligne de tramway.

Conformément à la démarche mise en œuvre pour l'étude vibratoire de la ligne complète [1], l'étude a pour objectif d'identifier les potentiels impacts vibratoires dans les secteurs d'aménagement de la ligne de tramway.

La démarche repose sur la mise en œuvre de simulations des niveaux vibratoires, et du bruit solidien, à l'intérieur de bâtiments représentatifs du secteur étudié.

L'objectif final étant de veiller à ce que l'impact soit minimal sur l'ensemble des bâtiments avoisinants, selon les critères du guide « FTA 2018 » [2], des mesures de réduction des vibrations sont proposées dans le cas où ces critères ne seraient pas respectés. Ces mesures consistent en l'insertion de systèmes de poses de voie anti-vibratiles dans les zones concernées.

2. DESCRIPTION DU SITE MODÉLISÉ

La Figure 1 présente le tracé de la ligne de tramway reliant le Pôle de Saint-Roch au Pôle D'Estimauville. Ce tracé emprunte 4 axes :

- La 4^e Rue ;
- La 4^e Avenue ;
- Le Chemin de la Canardière ;
- Le boulevard Saint-Anne.

Le Pôle D'Estimauville est situé près de l'intersection du boulevard Sainte-Anne et de l'avenue D'Estimauville. Un plan des aménagements du pôle d'échanges est présenté sur la Figure 2.

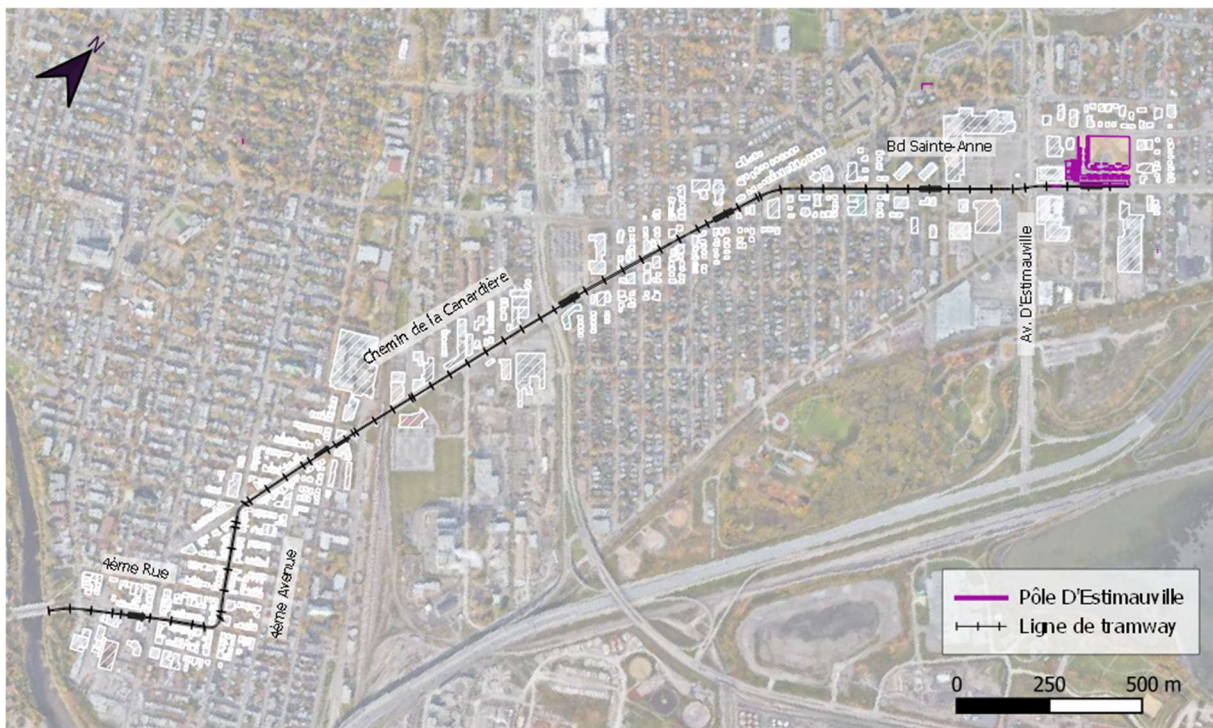


Figure 1 : Tracé de la ligne de tramway entre la 4^e Rue et le Pôle D'Estimauville



- | | | |
|-----------------------------------|--|--------------------------|
| ① Quai principal (départ/arrivée) | ⑦ Supports à vélos | — Cheminements piétons |
| ② Quai secondaire | ⑧ Débarcadère transport adapté | — Cheminements vélos |
| ③ Abribus | ⑨ Déambulateur principal et secondaire | ■ Plateforme ferroviaire |
| ④ Bâtiment de services | ⑩ Place publique | Zone parc |
| ⑤ Espace tempéré | ⑪ Structure de liaison | |
| ⑥ Vélostation | ⑫ Zone de manoeuvre Hydro-Québec | |

Figure 2 : Plan d'ensemble du Pôle D'Estimauville

3. RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de l'étude est identique à celle mise en œuvre pour l'étude de la ligne complète [1].

Les critères sont définis en termes de niveaux de vitesse vibratoire sur plancher et de bruit solidien dans les bâtiments sensibles étudiés, comme pour l'étude d'impact de la ligne complète [1]. Les valeurs cibles pour les deux catégories de bâtiments en présence dans les secteurs étudiés, sont indiquées dans le Tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Valeurs maximales recommandées de vitesse vibratoire (L_{vSmax}) et de bruit solidien (L_{pASmax}) à l'intérieur des résidences et bâtiments de bureaux, pour des événements fréquents, selon recommandations de FTA [2]

Catégorie de bâtiment selon usage	Niveau de vitesse vibration L_{vSmax} sur plancher (dBv réf. 5.10^{-8} m/s)	Niveau de bruit solidien L_{pASmax} (dB(A) réf. $20\mu Pa$)
Bâtiments où les personnes dorment usuellement : logement, hôtels, chambres d'hôpitaux, etc. (Catégorie 2)	66 (0.1 mm/s rms)	35
Bâtiments institutionnels et administratifs à activités diurnes essentiellement : lieux de culte, écoles, garderies, bureaux, etc. (Catégorie 3)	69 (0.14 mm/s rms)	40

La méthodologie peut se résumer comme suit :

- La première étape consiste à identifier les bâtiments/récepteurs sensibles à étudier dans cette nouvelle configuration du projet ;
- La deuxième étape consiste à réaliser des essais sur site pour caractériser les propriétés de transmissibilité des vibrations dans le sol, qui seront ensuite intégrées au modèle utilisé pour prédire les niveaux de vibration et de bruit solidien dans les bâtiments ;
- La troisième étape consiste à mettre en place un modèle permettant de caractériser les émissions vibratoires, la propagation des vibrations dans le sol depuis la source jusqu'en pied des bâtiments étudiés ;
- La quatrième étape consiste à calculer les niveaux de vitesse vibratoire et de bruit solidien dans les bâtiments sélectionnés, pour une pose de voie courante, c'est-à-dire sans mesures de mitigation ;
- Dans le cas où un dépassement des critères fixés en termes de niveau de vitesse vibratoire et de bruit solidien pour un ou plusieurs des bâtiments étudiés, serait constaté, l'effet apporté par une pose de voie anti-vibratile de performances appropriées pour atteindre les valeurs cibles, est simulé pour contrôle.

Pour rappel, trois types de pose de voie anti-vibratile fréquemment utilisés pour les lignes de tramway, ont été envisagés dans le cadre de l'étude d'impact vibratoire sur la ligne complète [1]. Les performances

d'atténuation vibratoire de ces poses de voie anti-vibratiles sont caractérisées par ce que l'on appelle, les pertes par insertion déterminées par bande de tiers d'octave. Les valeurs de pertes par insertion sont déterminées en comparant, pour une même section de ligne, les niveaux vibratoires émis avec une pose de voie anti-vibratile considérée et ceux observés avec une pose de voie classique sans atténuation. Ces valeurs sont fournies en général pour toutes les bandes de tiers d'octave utiles (entre 10 Hz et 250 Hz environ). La pose de voie de référence est une pose de voie directe sur dalle béton, dont les semelles sous rail présentent une raideur dynamique élevée (supérieure à 150 kN/mm).

Les trois types de pose de voie considérés sont :

- Une pose de voie sur dalle béton avec des semelles sous rail assouplies (environ égale à 50-60 kN/mm par support) ou équivalent ;
- Une pose de voie sur une dalle flottante reposant sur un tapis de matériau résilient d'épaisseur inférieure à 25mm ;
- Une pose de voie sur une dalle flottante reposant sur un tapis de matériau résilient de raideur optimale et d'épaisseur potentiellement à 25mm.

Note : Pour les sites très sensibles aux vibrations et proches du tracé, il peut être envisagé une pose de voie sur dalle flottante reposant sur des bandes ou des plots très résilients pour maximiser l'efficacité vibratoire.

4. SÉLECTION DES SITES D'ÉTUDES ET ZONES HOMOGÈNES ASSOCIÉS

La portion du tracé du tramway située entre le Pôle de Saint-Roch et le Pôle D'Estimauville est découpée en 21 zones homogènes, regroupant chacun des bâtiments de sensibilité vibratoire comparable et exposés à des niveaux vibratoires du tramway globalement similaires.

Pour chaque zone homogène, un bâtiment représentatif est sélectionné, représentant le groupe de bâtiments présents sur le tronçon. Par mesure conservatrice, le bâtiment choisi figure parmi les plus sensibles ou exposés de la zone.

L'application des critères de définition des zones homogènes et des bâtiments représentatifs associés a conduit au choix des sites d'études présentés sur la Figure 3. Les façades de ces bâtiments sélectionnés sont présentées sur les Figure 4 à Figure 8.

Il n'existe pas de bâtiments présentant une sensibilité particulièrement élevée le long du tracé d'étude.

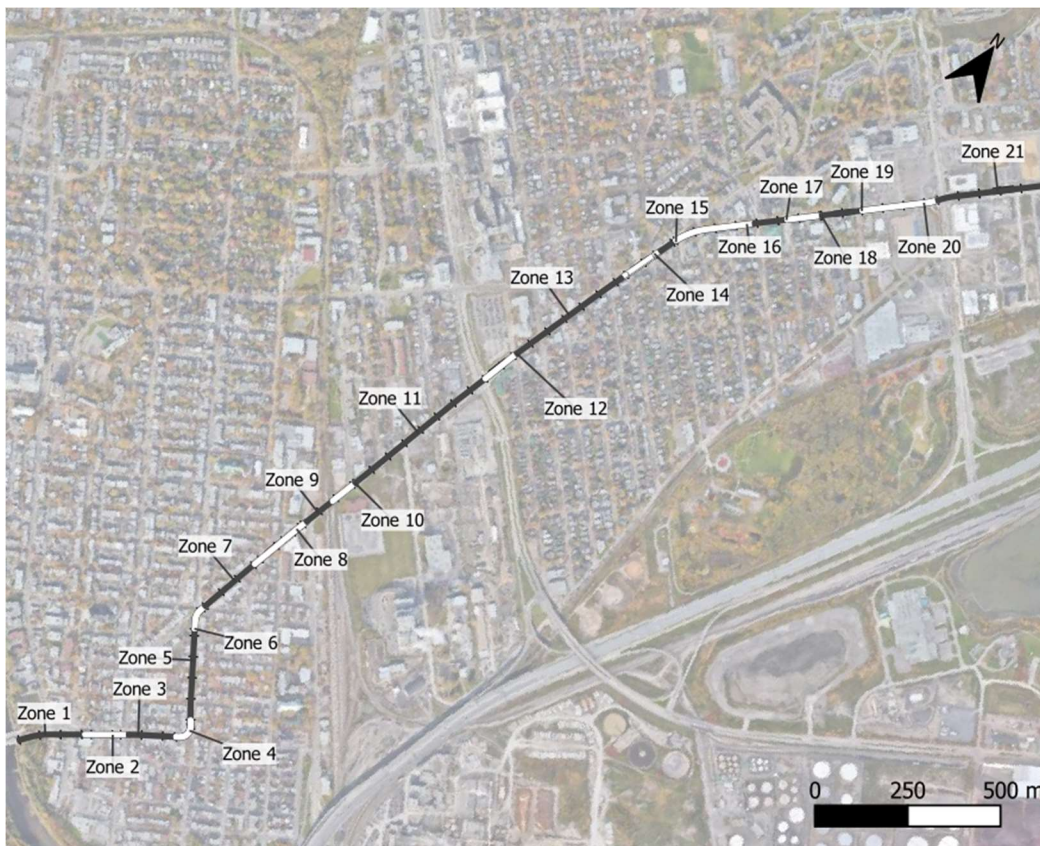


Figure 3 : Illustration des différentes zones d'exposition homogènes

Tableau 2 : Description des bâtiments et de la vitesse du tramway pour chaque zone homogène

Zone homogène	Bâtiment représentatif	Catégorie	Description du		PK		Longueur (m)	Distance à l'axe de la voie (m)	Vitesse du tramway en km/h
			Nombre d'étage	Type de bâtiment	Début	Fin			
1	Résidence	2	R+2	1	16+285	16+455	170	30	30
2	Résidence	2	R+2	1	16+456	16+575	119	18	Station
2	Bureau : Roy Métivier Roberge (Syndic autorisé en insolvabilité)	3	R+0	1	16+456	16+575	119	11	Station
3	Résidence	2	R+2	1	16+575	16+705	130	12	30
3	Résidence	2	R+2	1	16+575	16+705	130	8	30
4	Résidence	2	R+2	1	16+705	16+775	70	6	30
4	Bibliothèque Saint-Charles	3	R+0	1	16+705	16+775	70	7	30
5	Résidence	2	R+2	1	16+775	17+020	245	8	30
5	Résidence	2	R+3	1	16+775	17+020	245	9	30
5	Résidence	2	R+1	1	16+775	17+020	245	10	30
6	Résidence	2	R+1	1	17+020	17+090	70	8	30
7	Résidence	2	R+2	1	17+090	17+260	170	12	30
7	Résidence	2	R+1	1	17+090	17+260	170	11	30
8	Résidence	2	R+1	1	17+260	17+440	180	10	Station
8	Résidence	2	R+5	2	17+260	17+440	180	9	Station
8	Résidence	2	R+2	1	17+260	17+440	180	11	Station
8	Résidence	2	R+2	1	17+260	17+440	180	30	30
9	RIEN				17+440	17+530	90		30
10	Bureau Collaboration Santé internationale	3	R+1	1	17+530	17+610	80	11	40
11	Commerce : le doc du portable	3	R+1	1	17+530	17+610	80	10	40
11	Résidence	2	R+2	1	17+530	17+610	80	9	50
11	Résidence	2	R+2	1	17+530	17+610	80	11	50

Zone homogène	Bâtiment représentatif	Catégorie	Description du		PK		Longueur (m)	Distance à l'axe de la voie (m)	Vitesse du tramway en km/h
			Nombre d'étage	Type de bâtiment	Début	Fin			
11	Commerce : Gaëtan Moto	3	R+0	1	17+530	17+610	80	11	50
12	Résidence	2	R+2	1	17+610	18+170	560	16	Station
13	Commerce : Centre de service Desjardins	3	R+0	1	18+170	18+515	345	12	30
13	Résidence	2	R+1	1	18+170	18+515	345	8	30
13	Bibliothèque de Québec succursale Canadière	3	R+0	1	18+170	18+515	345	8	30
13	Résidence	2	R+1	1	18+170	18+515	345	10	30
14	Résidence	2	R+1	1	18+515	18+645	130	10	Station
15	Résidence	2	R+2	1	18+645	18+695	50	9	30
16	Résidence	2	R+2	1	18+695	18+920	225	14	50
17	Hôtel Le voyageur de Québec	2	R+1	1	18+920	19+005	85	15	50
18	Résidence	2	R+2	1	19+005	19+100	95	14	50
18	Résidence	2	R+1	1	19+005	19+100	95	20	50
18	Résidence	2	R+6	2	19+005	19+100	95	20	50
19	Résidence	2	R+6	2	19+100	19+210	110	20	Station
19	Commerce : Garage	3	R+0	1	19+100	19+210	110	20	Station
20	Commerce : Hart Grand	3	R+0	1	19+210	19+410	200	20	50
21	Bureau : Agence du revenu du Canada	3	R+4	2	19+410	19+690	280	7	30

Figure 4 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 1 à 5

Zone 1 : Résidence



Zone 2 : Résidence



Zone 2 : Bureau : Roy Métivier Roberge



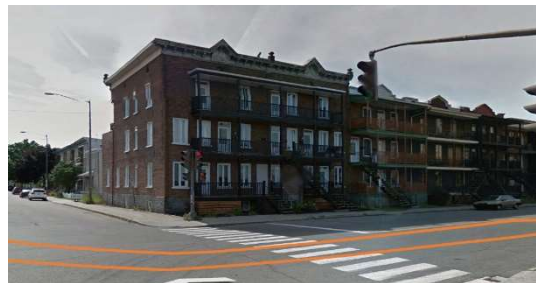
Zone 3 : Résidence



Zone 3 : Résidence



Zone 4 : Résidence



Zone 4 : Bibliothèque Saint-Charles



Zone 5 : Résidence



Figure 5 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 5 à 8

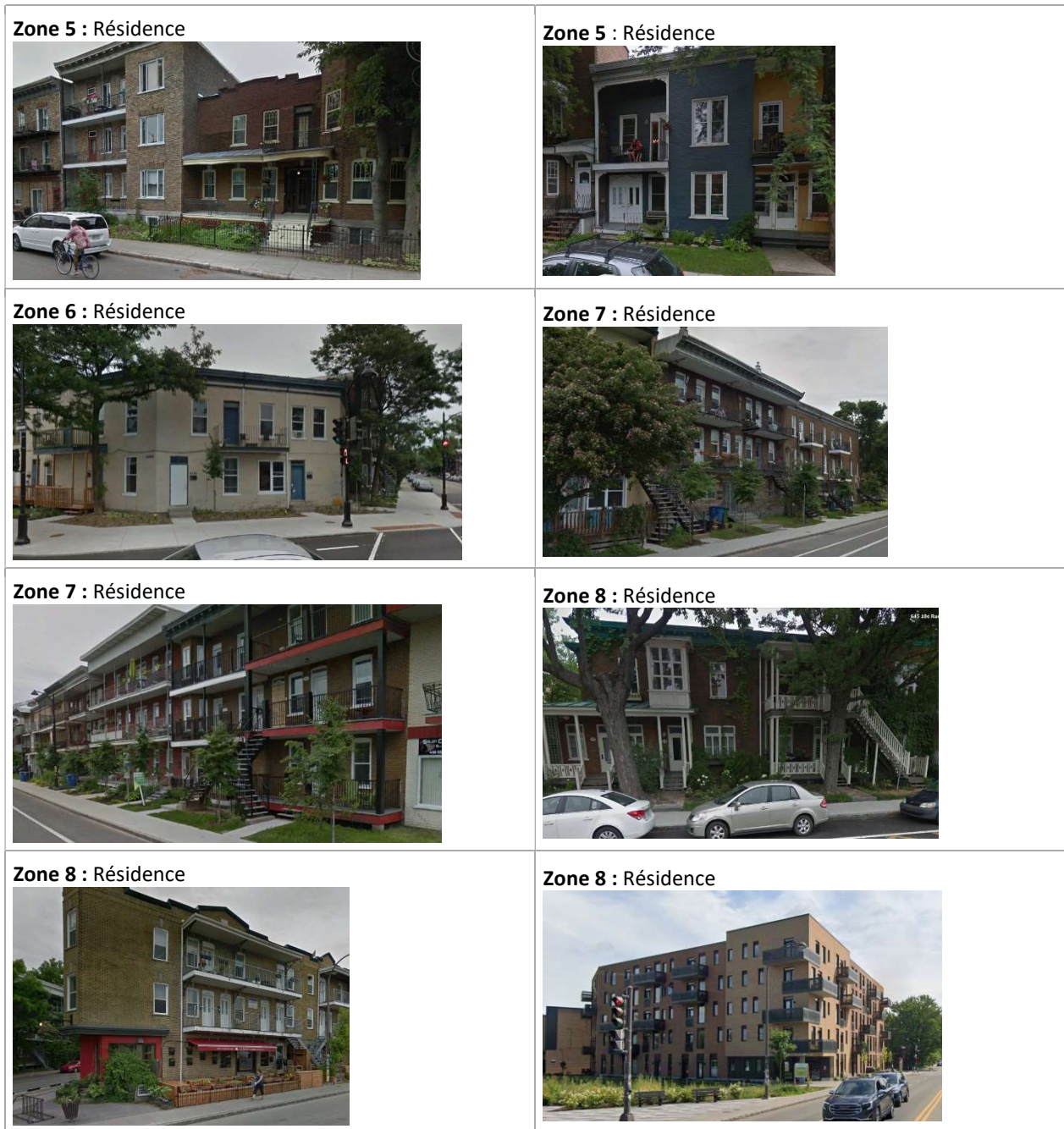


Figure 6 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 8 à 13

Zone 8 : Résidence



Zone 10 : Bureau Collaboration Santé



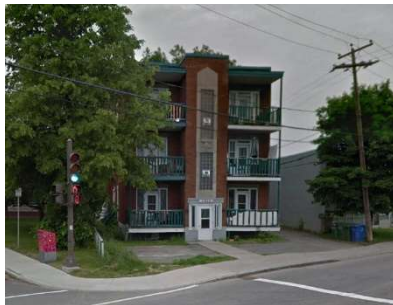
Zone 11 : Commerce : le doc du portable



Zone 11 : Résidence



Zone 11 : Résidence



Zone 11 : Commerce : Gaëtan Moto



Zone 12 : Résidence



Zone 13 : Commerce : Centre de service Desjardins



Figure 7 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 13 à 18

Zone 13 : Résidence



Zone 13 : Bibliothèque de Québec succursale Canardière



Zone 13 : Résidence



Zone 14 : Résidence



Zone 15 : Résidence



Zone 16 : Résidence



Zone 17 : Hôtel Le voyageur de Québec



Zone 18 : Résidence



Figure 8 : Vue des façades des bâtiments représentatifs pour les zones 18 à 21

Zone 18 : Résidence



Zone 18 : Résidence



Zone 19 : Résidence



Zone 19 : Commerce : Garage Rhéaume & Fils



Zone 20 : Commerce : Hart Grand magasin



Zone 21 : Bureau : Agence du revenu du Canada



5. DONNÉES D'ENTRÉE DU MODÈLE

A l'exception du tracé lui-même et de la vitesse d'exploitation dans le secteur concerné, les hypothèses de calcul restent identiques à celles utilisées dans l'étude d'impact vibratoire sur la ligne complète [1].

5.1 ÉMISSIONS VIBRATOIRES DU TRAMWAY

Les spectres d'émission vibratoire du matériel roulant aux différentes vitesses sont identiques à ceux utilisés lors de l'étude de la ligne complète.

Les vitesses de circulation du tramway dans le secteur étudié, pour le nouveau tracé, sont présentées sur la Figure 9.

Un appareil de voie est prévu dans le secteur étudié, il est localisé entre le point kilométrique 19+480 et le point kilométrique 19+510.

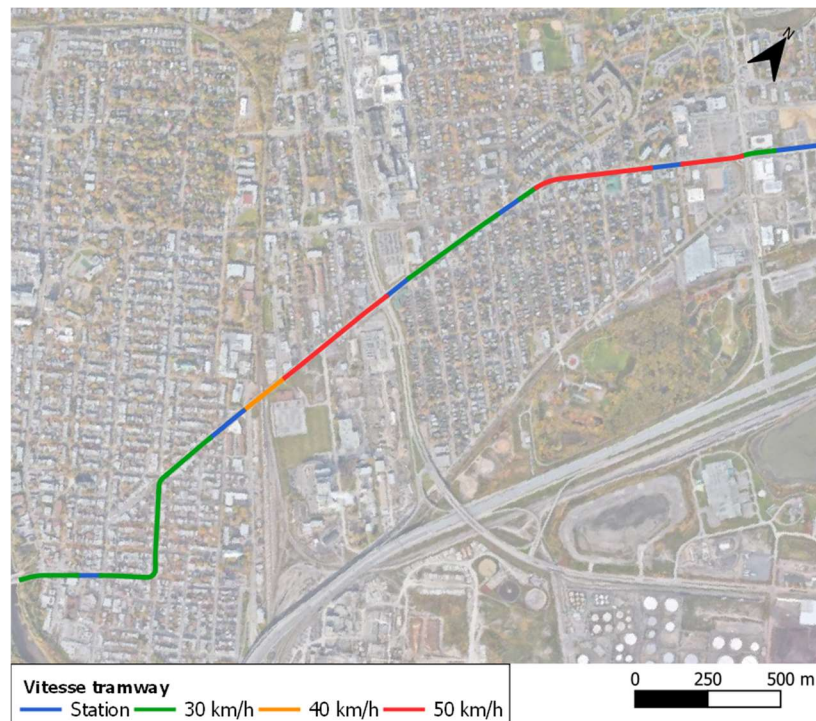


Figure 9 : Vitesse de circulation du tramway entre le Pôle de Saint-Roch et le Pôle D'Estimaerville

5.2 MESURE DE LA TRANSMISSIBILITÉ DES VIBRATIONS DANS LE SOL ET DANS LES BÂTIMENTS (MOBILITÉS DE TRANSFERT)

Une campagne d’essais vibratoires sur site a été réalisée du lundi 16 août au jeudi 19 août 2021 dans le but de caractériser :

- Les propriétés de transmissibilité des vibrations dans le sol en plusieurs emplacements situés le long du tracé (en cinq sites), et
- Les fonctions de transfert des vibrations du sol vers les bâtiments (pour cinq bâtiments représentatifs).

La description des essais réalisés est présentée dans le rapport d’essais [4].

La Figure 10 présente l’emplacement des sites d’essai de transmissibilité des vibrations dans le sol (notés *Sol ii*) et des fonctions de transfert sol/bâtiment (notés *Bâtiment jj*). L’adresse des sites et la date des essais figurent dans le Tableau 3.

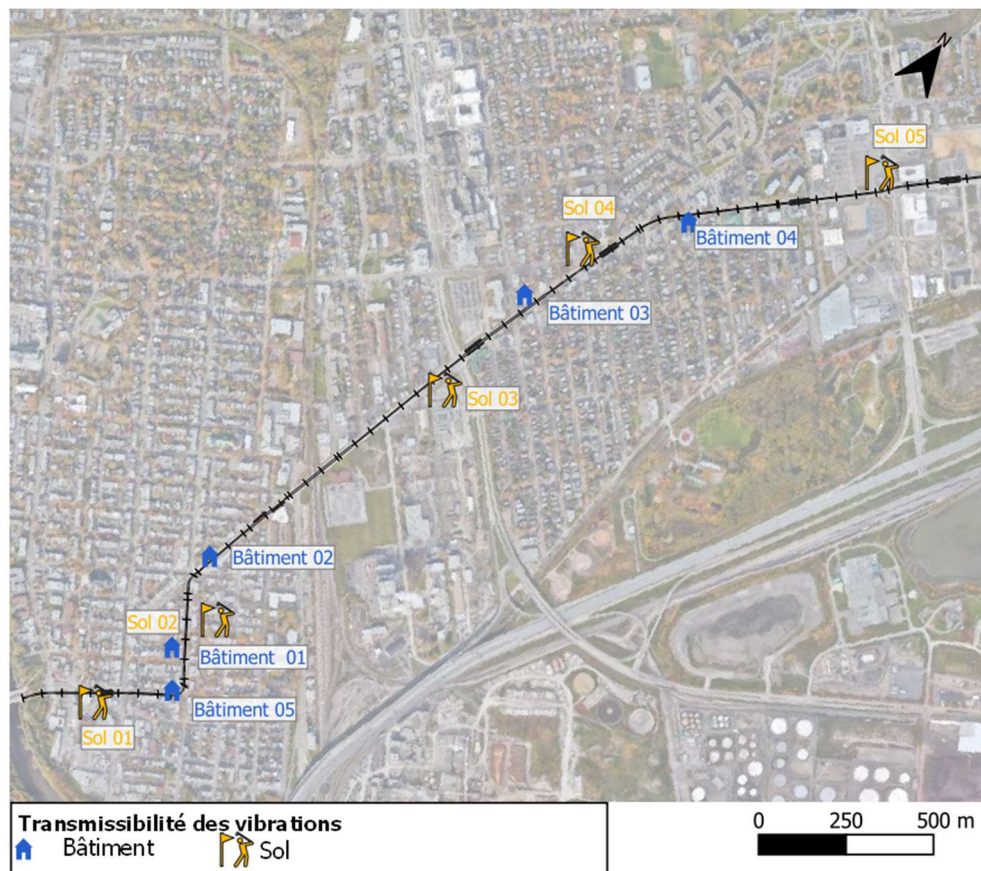


Figure 10 : Emplacement des sites de mesure de transmissibilité des vibrations dans le sol et des fonctions de transfert sol/bâtiment

Tableau 3 : Emplacement et date des essais de mesurage de la transmissibilité des vibrations dans le sol et des fonctions de transfert des bâtiments

Transmissibilité des vibrations dans les sols			Fonction de transfert entre sol et bâtiment		
Point de mesure	Adresse	Date de l'essai	Point de mesure	Adresse	Date de l'essai
Sol 01 (LTM 01)	Stationnement arrière de l'immeuble du Ben Huot au 250 4 ^e Rue	2021-08-16	Bâtiment 01 (FTbati 01)	580-582 4 ^e Avenue,	2021-08-16
Sol 02 (LTM 02)	Ruelle derrière le 534 7 ^e Rue	2021-08-16	Bâtiment 02 (FTbati 02)	552-554 Chemin de la Canardière	2021-08-17
Sol 03 (LTM 03)	Stationnement du garage municipal au 1252 Chemin de la Canardière	2021-08-19	Bâtiment 03 (FTbati 03)	Bibliothèque Canardière - 1601 Chemin de la Canardière – 1 étage	2021-08-18
Sol 04 (LTM 04)	Stationnement du Carrefour St-Pascal-de-Maizerets au 1885 Chemin de la Canardière	2021-08-20	Bâtiment 04 (FTbati 04)	2170 boulevard Sainte-Anne	2021-08-18
Sol 05 (LTM 05)	Stationnement à proximité de la station- Essence au 2541 boulevard Sainte-Anne	2021-08-16	Bâtiment 05 (FTbati 05)	Bibliothèque Saint-Charles - 400 4 ^e Avenue – 1 étage	2021-08-17

5.2.1 Transmissibilité des vibrations dans le sol

Les résultats des essais de caractérisation vibratoire des sols sont présentés et analysés dans ce chapitre.

Pour chaque site d'essai, un schéma des emplacements de mesure est présenté sur la Figure 11.

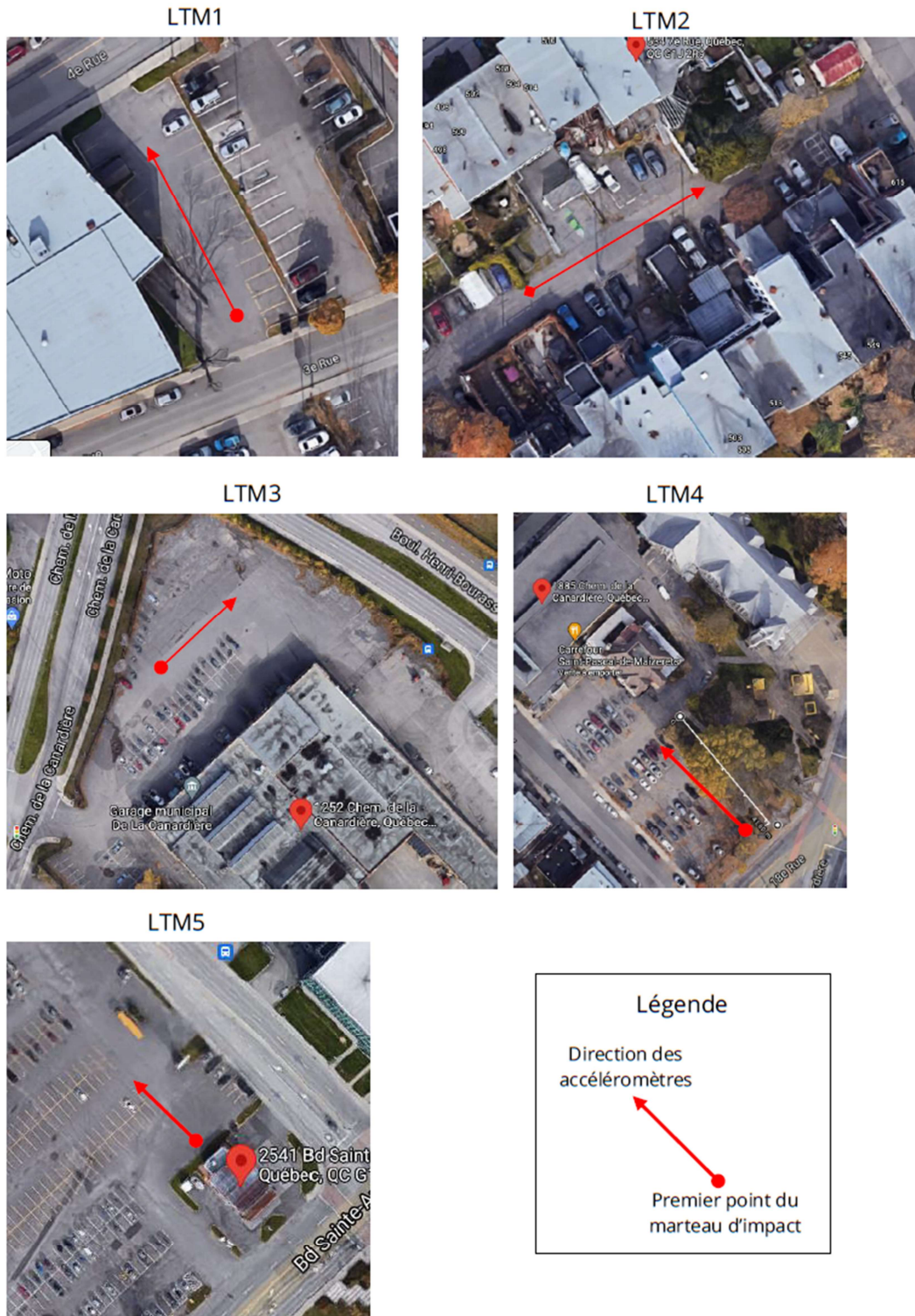


Figure 11 : Représentation schématique des emplacements des mesures de transmissibilité vibratoire du sol (LTM) [4]

La Figure 12 présente les courbes de mobilité de transfert dans le sol, pour une source linéique, déterminés à une distance de 12 m du tracé pour les cinq sites d’essais. Ces fonctions sont calculées en intégrant les mobilités de transfert ponctuelles mesurées.

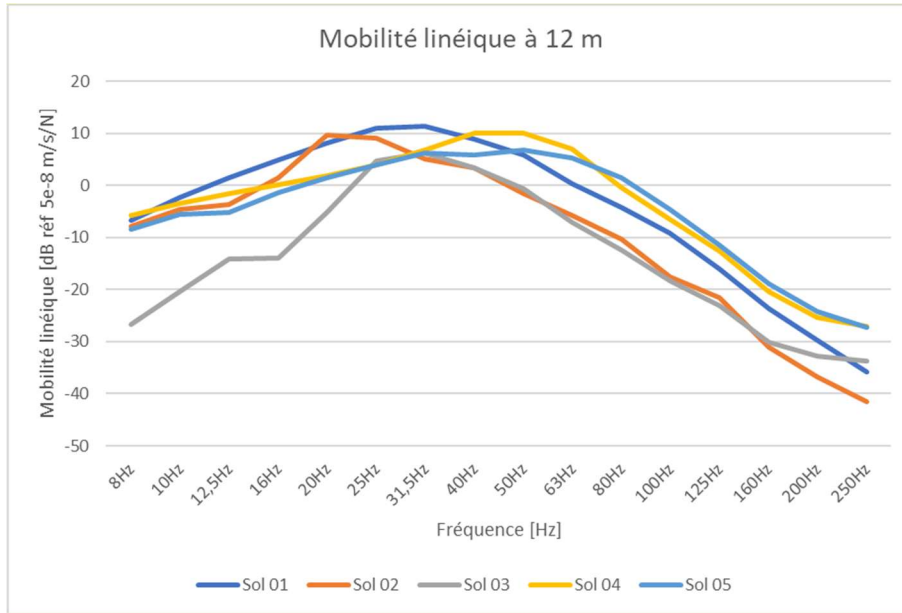


Figure 12 : Mobilités de transfert linéiques sur le sol à une distance de 12 m de la source pour les cinq sites d’essai

La figure montre que le site *Sol 01* a tendance à bien transmettre les vibrations sur toute la bande de fréquences de 8Hz à 250Hz. Les sites *Sol 04* et *Sol 05* présentent une forte transmissibilité au-dessus de 31.5Hz en particulier. La transmissibilité vibratoire du site *Sol 02* est élevée en particulier en basses fréquences, en dessous de 31.5Hz. La transmissibilité du site *Sol 03* est globalement plus faible que sur les autres sites, sur toute la bande de fréquences. Cette courbe de mobilité de transfert est globalement assez proche de celles mesurées sur le reste de la ligne. En revanche, sur les autres sites, la transmissibilité des vibrations est significativement plus élevée, en particulier en basses fréquences, que sur le reste du tracé; ceci est naturellement moins favorable d’un point de vue vibratoire.

Les valeurs d’atténuation vibratoire globale en décibels apportées par chacun des sols entre la source (linéique) et des points d’observations aux distances de 5 m, 7 m et 15 m, sont présentées sur la Figure 13. Cette figure permet d’apprécier comment chacun des sols caractérisés permet d’atténuer les niveaux vibratoires émis par le tramway.

Cette dernière figure indique que l’atténuation vibratoire du sol peut être considérée comme suit :

- Faible au niveau de la 4^e Rue, où l’atténuation est de uniquement de 3 dB sur 5 m et de 7 dB sur une distance de 15 mètres ;
- Moyenne sur la 4^e Avenue et le Chemin de la Canardière, à proximité avec l’intersection du boulevard Henri-Bourrassa, où l’atténuation vibratoire est égale à 16 dB sur une distance de 15 m ;

- Plutôt faible sur le reste du tracé (Chemin de la Canardière au boulevard Sainte-Anne), où l'atténuation est au minimum de 4 dB sur 5 m et de 9 dB sur une distance de 15 mètres ;

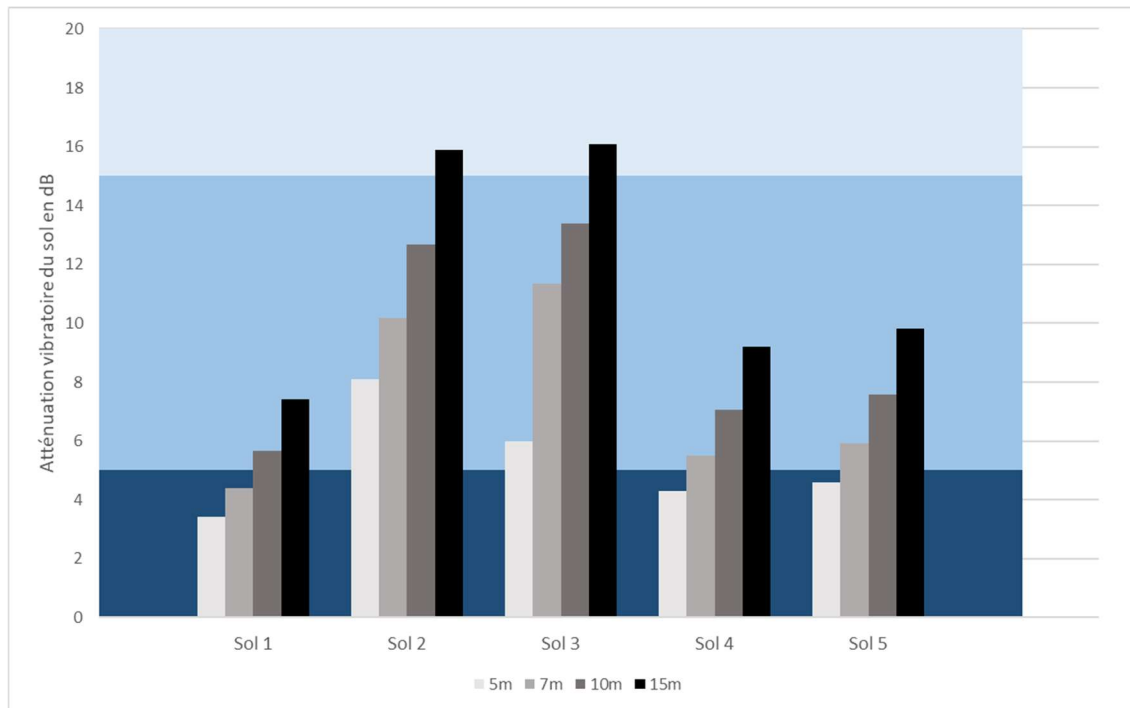


Figure 13 : Décroissance des niveaux vibratoires émis par le tramway en surface du sol pour les cinq sites caractérisés

5.2.2 Transmissibilité des vibrations dans les bâtiments

Les essais de caractérisation vibratoire des bâtiments ont pour objectifs de caractériser les fonctions de transfert suivantes :

- FT2 qui est le rapport entre les vitesses vibratoires mesurées sur la fondation et au sol en pied de bâtiment, exprimée en décibels ;
- FT3 qui est le rapport entre les vitesses vibratoires mesurées sur le plancher et la fondation, au même étage, également exprimée en décibels ;
- La fonction de transfert globale du bâtiment (notée *FT_{bâti}*) est donnée par la somme (en décibels) des deux fonctions de transfert *FT2* et *FT3*. Elle peut également être mesurée, donnant alors le rapport entre les vitesses particulières mesurées sur le plancher et au sol à l'extérieur du bâtiment.

A l'issue de l'analyse des essais de caractérisation vibratoire des bâtiments, les résultats des essais ont été confrontés aux mesures réalisées lors l'étude de la ligne complète [1].

La Figure 16 et la Figure 17 représentent les points de mesures pour la caractérisation des fonctions de transfert sol/bâtiments réalisés en 2021.

Les essais ont été réalisés pour deux typologies de bâtiments :

- Type 1 : petits bâtiments à ossature bois, reposant sur un soubassement (étage semi-enterré ou sous-sol) en béton ;
- Type 2 : grands bâtiments en béton, reposant généralement sur des stationnements en sous-sol.

Les fonctions de transfert mesurées (FT2, FT3 et FTbâti) pour les bâtiments de type 1 sont données sur la Figure 14 ci-dessous. Les fonctions de transferts mesurées en 2019 et en 2021 correspondent respectivement aux traits pleins et aux traits en pointillés.

L'analyse des essais de caractérisation vibratoire des cinq bâtiments sélectionnés sur le nouveau tracé vers l'Est, révèle des résultats en termes de fonctions de transfert FT2, FT3 et FTbâti, proches de ceux déterminés sur l'ensemble de la ligne à l'issue de la précédente campagne d'essais en 2019 équivalent à des bâtiments de type 1.

Le gabarit retenu pour la fonction de transfert FT3 des bâtiments de type 1 correspond à un bâtiment avec plancher léger résonnant à 16 Hz tel que défini dans le modèle statistique du logiciel Vibra-1-2-3, présenté dans le cadre du projet de recherche européen RIVAS.

Les fonctions de transfert FT2, FT3 et FTbâti utilisées pour la modélisation des bâtiments de type 2 sont rappelées sur la Figure 15.

Fonction de transfert – Bâtiment type 1

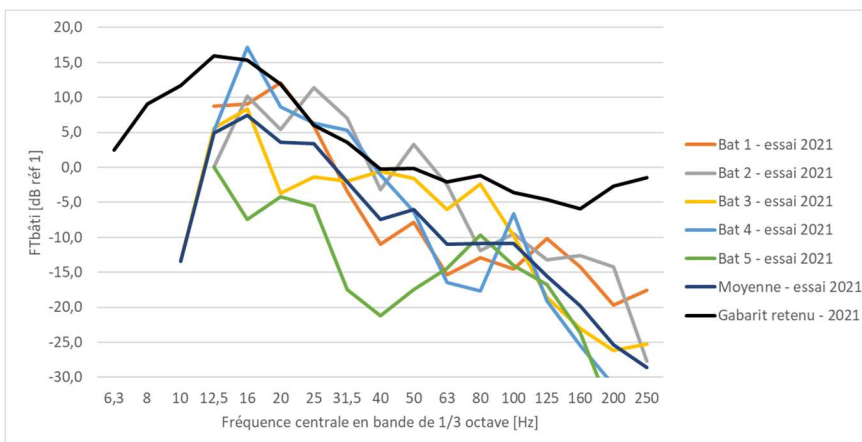
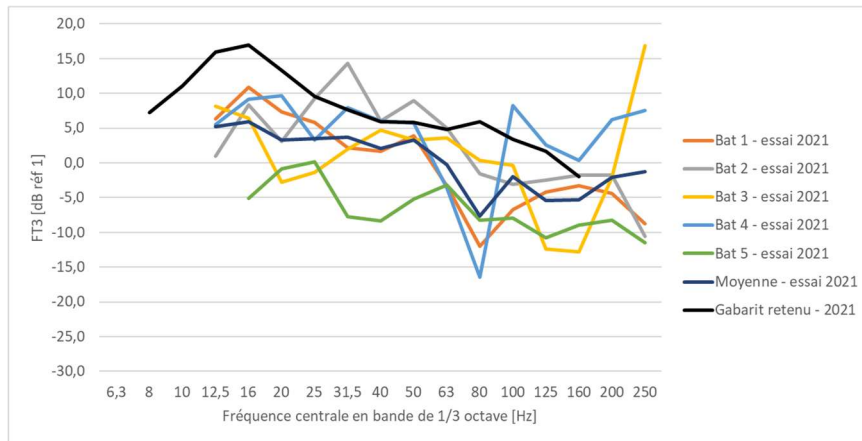
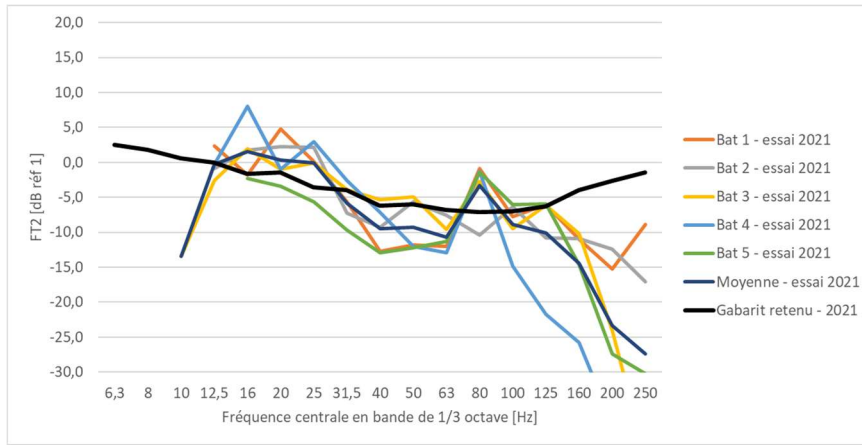


Figure 14 : Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTb) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 1

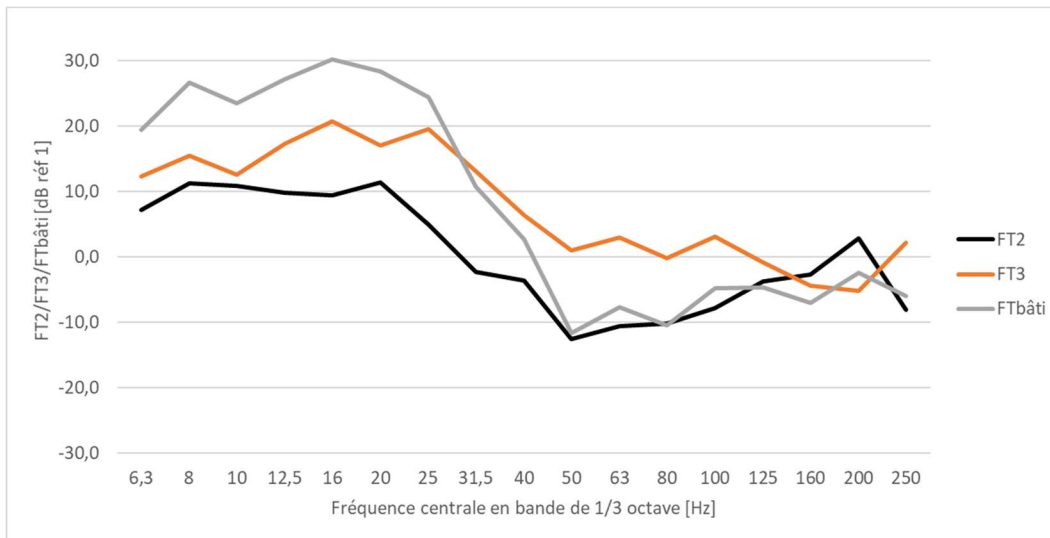
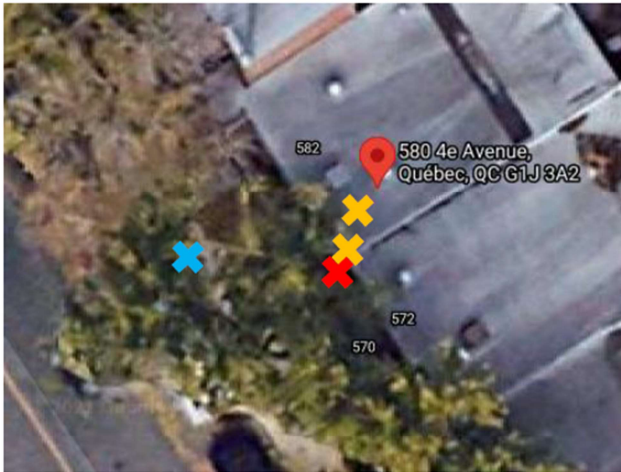
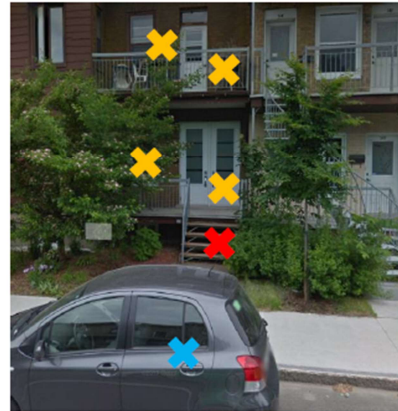
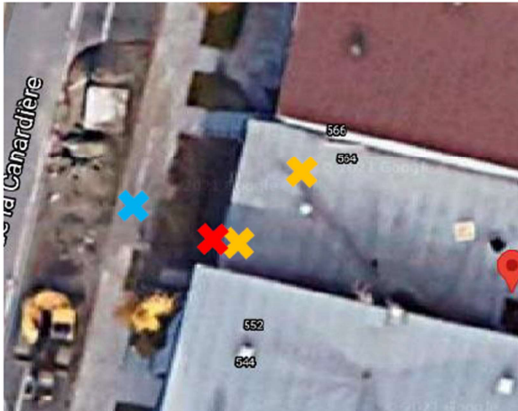


Figure 15 : Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTB) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 2

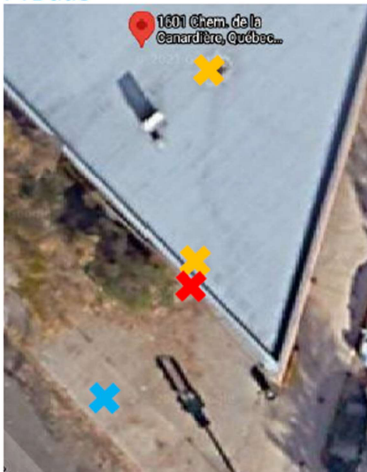
FTBati1



FTBati2



FTBati3

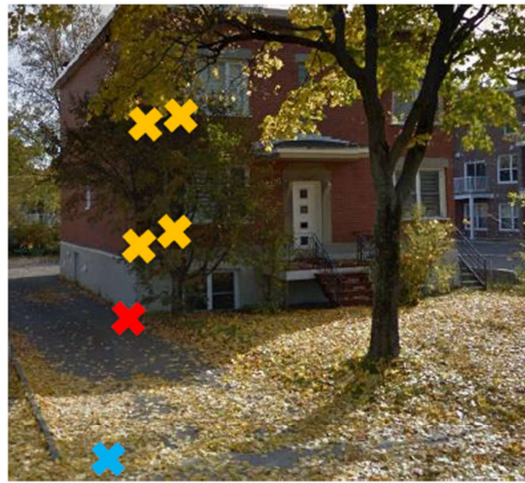
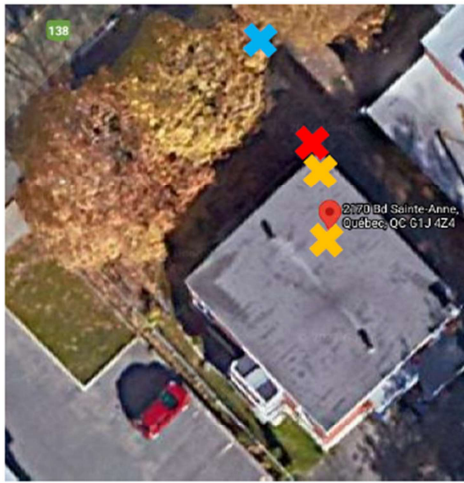


Légende :

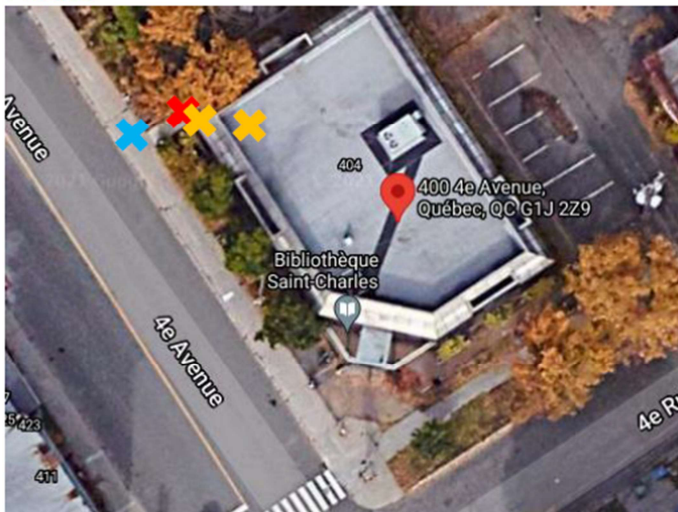
- Marteau d'impact
- Point extérieur
- Points intérieurs

Figure 16 : Représentation des points de mesures pour la caractérisation des fonctions de transfert sol/bâtiments [4]

FTBati4



FTBati5



Légende :

- Marteau d'impact
- Point extérieur
- Points intérieurs

Figure 17 : Représentation des points de mesures pour la caractérisation des fonctions de transfert sol/bâtiments [4]

6. RÉSULTAT DU CALCUL D'IMPACT VIBRATOIRE

6.1 RESULTATS SANS MESURES DE MITIGATION

Pour chaque zone homogène, un calcul de l'impact vibratoire du projet est réalisé. Cette section présente les résultats obtenus pour les bâtiments représentatifs sélectionnés le long du tracé du tramway, en considérant une pose de voie courante (sans dispositif d'atténuation). Les résultats sont présentés dans le Tableau 5, en termes de niveaux de vitesse vibratoire sur le plancher (L_{vSmax}) et de niveaux de bruit solidien (L_{pASmax}) à l'intérieur des bâtiments sélectionnés, et sont comparés aux valeurs cibles. Pour faciliter la lecture, les valeurs en excès des valeurs cibles sont indiquées en rouge.

Les critères retenus et le code couleur utilisé pour évaluer le niveau de risque d'impact en fonction des niveaux vibratoires et des niveaux de bruit solidien calculés sont résumés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Critère d'identification des niveaux d'impact et code couleur utilisé

Niveau d'impact	Dépassement des seuils retenus	Code couleur
Risque d'impact nul ou mineur	≤ 0.5 dB(A)	
Risque d'impact modéré	Entre +1 et +3.5 dB(A)	
Risque d'impact fort	Supérieur ou égal à +4 dB	

Tableau 5 : Résultats de simulation des niveaux de vitesse vibratoire et de bruit solidien avec une pose de voie courante

Zone homogène	Bâtiment représentatif	Catégorie	Distance entre voie et bâtiment (m)	Type de bâtiment	Profil sol	Vitesse du tramway en km/h	Résultats de simulation				Risque d'impact
							Niveaux de vitesse vibratoire (dBv)		Niveaux de bruit solidien (dBA)		
							Seuil	Calcul	Seuil	Calcul	
1	Résidence	2	30	1	1	30	66	58,5	35	25	
2	Résidence	2	18	1	1	Station	66	58,0	35	24	
2	Bureau : Roy Métivier Roberge (Syndic autorisé en insolvabilité)	3	11	1	1	Station	69	60,0	40	27	
3	Résidence	2	12	1	1	30	66	62,5	35	35	
3	Résidence	2	8	1	1	30	66	64,0	35	37	
4	Résidence	2	6	1	2	30	66	64,0	35	38	
4	Bibliothèque Saint-Charles	3	7	1	2	30	69	61,0	40	30	
5	Résidence	2	8	1	2	30	66	63,0	35	34	
5	Résidence	2	9	1	2	30	66	62,0	35	33	

Zone homogène	Bâtiment représentatif	Catégorie	Distance entre voie et bâtiment (m)	Type de bâtiment	Profil sol	Vitesse du tramway en km/h	Résultats de simulation				Risque d'impact
							Niveaux de vitesse vibratoire (dBv)		Niveaux de bruit solidien (dBA)		
							Seuil	Calcul	Seuil	Calcul	
5	Résidence	2	10	1	2	30	66	61,5	35	32	
6	Résidence	2	8	1	2	30	66	63,0	35	34	
7	Résidence	2	12	1	2	30	66	60,0	35	30	
7	Résidence	2	11	1	2	30	66	61,0	35	31	
8	Résidence	2	10	1	2	Station	66	58,5	35	29	
8	Résidence	2	9	2	2	Station	66	49,0	35	22	
8	Résidence	2	11	1	2	Station	66	58,0	35	28	
8	Résidence	2	30	1	2	30	66	50,5	35	18	
9	Absence bâtiments sensibles	-			3	30	-	-	-	-	
10	Bureau Collaboration Santé internationale	3	11	1	3	40	69	55,0	40	34	
11	Commerce : le doc du portable	3	10	1	3	40	69	57,5	40	37	
11	Résidence	2	9	1	3	50	66	58,5	35	38	
11	Résidence	2	11	1	3	50	66	57,0	35	36	
11	Commerce : Gaëtan Moto	3	11	1	3	50	69	57,0	40	36	
12	Résidence	2	16	1	3	Station	66	45,0	35	24	
13	Commerce : Centre de service Desjardin	3	12	1	3	30	69	59,0	40	37	
13	Résidence	2	8	1	3	30	66	60,5	35	40	
13	Bibliothèque de Québec succursale Canadière	3	8	1	3	30	69	59,5	40	37	
13	Résidence	2	10	1	3	30	66	59,5	35	38	
14	Résidence	2	10	1	4	Station	66	56,5	35	35	
15	Résidence	2	9	1	4	30	66	60,0	35	39	
16	Résidence	2	14	1	4	50	66	65,0	35	42	
17	Hôtel Le voyageur de Québec	2	15	1	5	50	66	62,5	35	38	
18	Résidence	2	14	1	5	50	66	63,0	35	39	
18	Résidence	2	20	1	5	50	66	61,0	35	36	
18	Résidence	2	20	2	5	50	66	53,0	35	26	
19	Résidence	2	20	2	5	Station	66	40,5	35	19	
19	Commerce : Garage Rhéaume & Fils	3	20	1	5	Station	69	51,5	40	27	
20	Commerce : Hart Grand magasin	3	20	1	5	50	69	61,0	40	36	
21	Bureau : Agence du revenu du Canada	3	7	2	5	30	69	45,5	40	29	

Commentaires :

Les niveaux de vitesse vibratoire sur plancher générés par le tramway en exploitation à l'intérieur des bâtiments représentatifs pour le cas d'une pose de voie courante (sans mesures de mitigation) sont inférieurs aux valeurs limites définies, pour l'ensemble des bâtiments sensibles sélectionnés. En d'autres termes, le risque d'impact lié à la perception tactile des vibrations, est très faible même sans dispositif particulier d'atténuation des vibrations.

Les niveaux de bruit solidien calculés à l'intérieur des bâtiments sensibles sont globalement faibles à modérés. Les seuils définis sont respectés sur la plupart des zones homogènes à l'exception des zones 3, 4, 11, 13, 15, 16, 17 et 18. Le seuil de bruit solidien est dépassé de +1 à +3 dB pour les zones 3, 4, 11 et 17. Le dépassement est plus important pour les zones 13, 15, 16 et 18 : +4dB pour les zones 15 et 18, +5dB pour la zone 13, et +7dB pour la zone 16.

6.2 RESULTATS AVEC MESURES DE MITIGATION

Une synthèse des résultats obtenus après simulation de l'effet des dispositifs de voie anti-vibratile est présentée dans le tableau ci-après.

Un code couleur est utilisé dans la colonne de droite du tableau pour indiquer le type de pose de voie retenu. Ce code est le suivant :

- Pose de voie avec semelles sous rail assouplies
- Pose de voie sur dalle flottante

Tableau 6 : Résultats de simulation des niveaux de vitesse vibratoire et de bruit solidien avec dispositif de voie anti-vibratile

Zone homogène	Bâtiment représentatif	Catégorie	Distance entre voie et bâtiment (m)	Type de bâtiment	Profil sol	Vitesse du tramway en km/h	Résultats de simulation				Pose de voie retenue
							Niveaux de vitesse vibratoire (dBv)		Niveaux de bruit solidien (dBA)		
							Seuil	Calcul	Seuil	Calcul	
3	Résidence	2	8	1	1	30	66	63,5	35	34	
4	Résidence	2	6	1	2	30	66	63,5	35	35	
11	Résidence	2	9	1	3	50	66	58,0	35	35	
11	Résidence	2	11	1	3	50	66	56,5	35	33	
13	Résidence	2	8	1	3	30	66	58,5	35	30	
13	Résidence	2	10	1	3	30	66	59,0	35	35	
15	Résidence	2	9	1	4	30	66	58,0	35	29	
16	Résidence	2	14	1	4	50	66	63,0	35	32	
17	Hôtel Le voyageur de Québec	2	15	1	5	50	66	62,0	35	35	
18	Résidence	2	14	1	5	50	66	61,0	35	29	
18	Résidence	2	20	1	5	50	66	60,5	35	33	



Commentaires :

Les dispositifs de voie anti-vibratile envisagés permettent de réduire suffisamment les niveaux de bruit solidien dans les bâtiments sensibles où les seuils étaient dépassés pour une pose de voie classique sans atténuation.

Pour les zones 3, 4, 11 et 17, une pose avec semelles sous rail assouplies est nécessaire et suffisante.

Pour les zones 13, 15, 16 et 18, il est nécessaire de mettre en place une pose de voie sur dalle flottante.

7. CONCLUSION

Cette étude vise à analyser les risques d'impact lié aux vibrations générées par le tramway en exploitation, entre la 4^e Rue et le futur Pôle D'Estimauville, implanté à proximité de l'avenue D'Estimauville et du boulevard Sainte-Anne.

Les simulations réalisées pour les bâtiments sensibles sélectionnés, le long du tracé du tramway, ont permis de calculer les niveaux de vibrations et de bruit solidien dans les bâtiments, puis de les comparer aux valeurs cibles prédéfinies.

Les simulations ont d'abord été réalisées pour une pose de voie classique (sans dispositif d'atténuation des vibrations). Les résultats des modélisations indiquent que les valeurs cibles de vitesse vibratoire sur plancher sont respectées dans tous les bâtiments étudiés. En conséquence, le risque d'impact lié à la perception tactile des vibrations, est très faible sur tout le tracé, même sans prévoir de dispositif particulier d'atténuation des vibrations.

Les niveaux de bruit solidien calculés à l'intérieur des bâtiments sensibles sont globalement faibles à modérés. Les seuils définis sont respectés sur la plupart des zones homogènes à l'exception des 8 zones sur les 21 zones homogènes prédéfinies. Le seuil de bruit solidien est dépassé de +1 à +7 dB selon la zone considérée, indiquant un risque d'impact faible à modéré pour les 6 zones où le dépassement des seuils est entre 0.5 et 4dB, et un risque d'impact significatif ou fort pour les 2 zones restantes où le dépassement des seuils est entre +5 et +7dB.

La mise en place de systèmes de pose de voie anti-vibratile permet de respecter les critères sur les sites où ces derniers sont dépassés dans le cas d'une pose de voie ferrée classique. Le système de pose de voie avec une semelle (ou couche) élastique souple sous le rail est utilisée pour les 4 zones où le dépassement du seuil de bruit solidien est inférieur ou égal à +3dB. Ce système est fréquemment utilisé et relativement peu onéreux. La solution de pose sur dalle flottante, plus performante que la pose précédente, mais aussi plus contraignante en termes de construction et d'entretien, est nécessaire, au stade actuel des études, sur les 4 zones où un dépassement des seuils (avec pose de voie classique) est supérieur ou égale à 4dB.



8. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- [1] Mandat 10.1 – Mémoire Technique – rapport Étude Vibratoire (Référence : FR01T19A18-T-IDP3-MT-GE00-0005-B)
- [2] Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual. FTA Report No. 0123 (2018).
- [3] M. Villot, E. Augis, C. Guigou-Carter, P. Jean, P. Ropars, S. Bailhache & C. Gallais (2016) Vibration emission from railway lines in tunnel – characterization and prediction, International Journal of Rail Transportation, 4:4, 208-228, DOI: 10.1080/23248378.2016.1220267. To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/23248378.2016.1220267>
- [4] Tramway de Québec RSTC – Mesures de caractérisation vibratoire complémentaire – Septembre 2021 – Projet n°A21 -0089-RST – Atelier 7Hz Ingénierie acoustique et vibrations